

Explorer et comprendre les fonds et sous-sols sous-marins dans un contexte d'exploitation durable des ressources minérales et énergétiques

L'océan est un réservoir de richesses minérales (granulats, nodules, amas sulfurés, encroûtements...), énergétiques (pétrole et gaz, énergies marines renouvelables) et biologiques. Ces ressources se situent dans des environnements variés (marges continentales, rides océaniques ou plaines abyssales) et sont loin d'être inventoriées. L'ambition scientifique est, non seulement de contribuer au développement de ce socle de connaissance, mais aussi de mieux comprendre, par une approche systémique, l'évolution des fonds marins, les processus de formation des ressources et la structure et le fonctionnement des écosystèmes associés.

Les marges continentales et les nouveaux enjeux

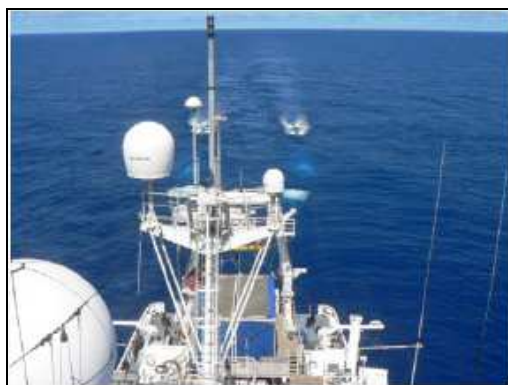
Zones frontières entre les domaines continental et océanique, les marges continentales occupent une place singulière à l'échelle de la planète. Elles enregistrent, au cours de leur évolution et par l'intermédiaire de la colonne sédimentaire qui s'y dépose, tous les grands processus géologiques, chimiques et biologiques qui modèlent notre planète : mouvements dynamiques, érosion et pénétrations, variations paléo climatiques, transfert de sédiment et de nutriment.

Exploration et modélisation des marges

Dans ce contexte, les études sur les **marges du Brésil, du Maroc, du canal du Mozambique ou en Méditerranée occidentale** contribuent à la compréhension de la formation de ces objets géologiques, de la relation entre processus de surface et profonds, des variations climatiques et eustatiques.

Effectuée à bord du N/O *L'Atalante* en avril et mai 2014, la **campagne Salsa** a apporté des éléments clés sur la segmentation de la marge du Nordeste brésilien, l'influence de l'héritage tectonique, la relation avec la partie terrestre et l'état thermique du manteau sous-jacent. Les résultats ont abouti à une proposition de forage profond *International Ocean Drilling Program* (IODP), mené conjointement par des équipes brésiliennes et l'Ifremer. Dans le même temps, la pré-proposition de forage goLD dans le golfe du Lion a été acceptée en avril 2014 par le comité scientifique et technique international de l'IODP dans le but de calibrer le modèle d'évolution d'un segment de marge « jeune ».

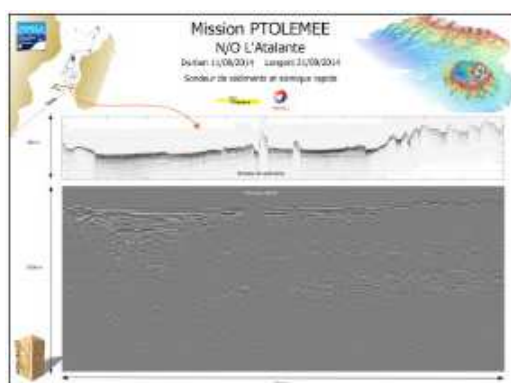
L'élaboration de nouvelles cartes étant nécessaire pour la géodynamique, la topographie dynamique, l'étude du paléoclimat et des paléocourants, des séismes, de l'évolution biologique même, l'Institut a parallèlement développé le logiciel Placa 4D, qui permet les reconstructions paléogéographiques de données géoréférencées.



Fruit d'un partenariat conclu en 2013 entre Total et l'Ifremer, le **projet Pamela** (*Passive Margins Exploratory Laboratories*) a pour objectif d'étudier l'évolution des marges passives et les processus associés, depuis la rupture continentale jusqu'aux dépôts sédimentaires actuels. Cinq thématiques clés nécessitant l'acquisition de données originales ont été définies : la géodynamique, les modèles sédimentaires, les aléas géologiques, les transferts de fluides et l'environnement.

Le partenariat s'est élargi au CNRS, à trois unités mixtes de recherche université-CNRS (universités de Bretagne occidentale, Rennes I et Pierre et Marie Curie) et à l'IFPEN. D'autres universités françaises ou européennes coopèrent, ainsi que des universités malgache et mozambicaine.

Au cours de l'année 2014, l'exploration du canal du Mozambique a débuté par trois mois de campagnes à la mer. Les résultats portent sur la partie profonde du système sous-marin du Zambèze, qui recueille les produits de l'érosion des bassins versants de l'Afrique de l'Est, de Madagascar et des atolls carbonatés du canal. Ces atolls récifaux des îles éparées sont d'excellents exemples pour comprendre à la fois la genèse d'un atoll et l'évolution d'un système carbonaté sous différents forçages. À la faveur de ces explorations, des instabilités d'édifices volcaniques et carbonatés ont été cartographiées. Des environnements et écosystèmes spécifiques profonds liés à ces édifices, à l'hydrothermalisme ou à la circulation de fluide ont été repérés et certains échantillonnés. Par ailleurs, l'étude du fonctionnement d'un vaste système géologique découvert en 2013 sur le rebord du plateau aquitain s'est poursuivie en 2014 avec l'analyse des données des campagnes Pamela-Gazcogne 1 & 2. Les émissions de méthane biogénique, les structures carbonatées authigènes et les écosystèmes associés ont été caractérisés.



Les marges exposées aux aléas géologiques

L'étude des aléas géologiques se conduit selon un schéma allant de l'identification des processus physiques (facteurs déclencheurs, causals ou prédisposants), en passant par la détection des indices de déformation (par la cartographie géophysique et l'imagerie, les mesures *in situ* et le suivi temporel) et l'évaluation des hasards (probabilité d'occurrence d'un danger au cours d'une période de temps).

L'année 2014 a été marquée par deux contributions particulières sur ce sujet :

- Le **programme de recherche Spiral** visait à étudier la structure profonde de la marge nord-algérienne. Les partenaires du projet sont le CRAAG, Sonatrach et la DGRSDT, l'Ifremer, le CNRS, l'IRD et les universités Pierre et Marie Curie, de Nice-Sophia Antipolis et de Bretagne occidentale. Pour la formation des jeunes chercheurs et ingénieurs algériens et le transfert de connaissances, dix thèses ont été conduites, dont huit en cotutelle franco-algérienne. Ce programme s'est terminé en 2014, avec comme principaux résultats la description de la structure profonde de la marge algérienne : détermination de l'épaisseur des bassins sédimentaires, nature de la croûte et de la géométrie de l'interface croûte-manteau.

- La **campagne Marsite** (28 octobre-16 novembre) du N/O *Pourquoi pas ?* a conduit à des données nouvelles pour comprendre le fonctionnement de la faille nord-anatolienne en mer de Marmara, dans le cadre du programme Marsite, soutenu par l'Union européenne. Dix stations de géodésie acoustique de Geomar et de l'UMR « Domaines océaniques » de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) ont été déployées en fond de mer pour mesurer directement, et pour la première fois, le mouvement relatif des plaques dans la région d'Istanbul. Par ailleurs, le ROV *Victor 6000* a été mis en œuvre pour acquérir de nombreux échantillons (eaux interstitielles, gaz, saumures, pétrole) et des mesures spectroscopiques raman *in situ*, dans le but de comprendre les processus de migration des fluides le long des failles.



Fig. 1 : Mesure Raman sur des sorties de gaz au-dessus de filaments bactériens

Cycle des métaux et genèse des ressources minérales

Au cours de l'année 2014, les processus de mobilisation des métaux dans les roches ont été étudiés sur deux sites hydrothermaux actifs de la ride médio-atlantique lors de la **campagne Bicoise**, réalisée à bord du N/O *Pourquoi pas ?*. Un spectromètre de masse *in situ* a été mis en œuvre avec le ROV *Victor 6000* pour la détection et la cartographie des panaches hydrothermaux

et, en particulier, pour la mesure des concentrations en méthane, gaz carbonique et hydrogène. Le panache hydrothermal des sites « TAG » et « Snake Pit » a pu être détecté au cours des premiers essais de mesure *in situ* dans la colonne d'eau, ce qui laisse présager d'excellentes possibilités de mesures à très faibles concentrations.

Le transport des métaux dans la colonne d'eau a fait l'objet d'une coopération entre l'université d'Hawaï, Woods Hole et l'Ifremer sur les sites hydrothermaux de basse température situés sur le volcan sous-marin Loihi, à l'est d'Hawaï, afin d'étudier le cycle du fer à partir d'approches géochimiques et isotopiques dans la colonne d'eau, dans les fluides hydrothermaux et dans les précipités d'hydroxydes de fer. En parallèle, dans le cadre du LabexMer, de nouveaux éclairages ont pu être apportés sur les processus de stabilisation qui facilitent le transport du fer dans l'océan, à partir de l'analyse des isotopes du fer, utilisés comme traceurs de la dispersion des panaches hydrothermaux.



Impacts environnementaux d'une exploitation des ressources minérales

Le CNRS et l'Ifremer ont été mandatés par le Commissariat général au développement durable (MEDDE) pour mener une expertise scientifique collective (ESCO) sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Cette expertise se concentre essentiellement sur les ressources minérales situées à plus de 300 m de profondeur : **les nodules polymétalliques, les sulfures polymétalliques et les encroûtements de manganèse**. Une synthèse des connaissances scientifiques disponibles sur le sujet au plan international a été établie et a permis d'identifier les verrous scientifiques et les activités de recherche et de développement à engager pour les lever. Les conclusions ont été présentées lors d'un colloque, le 19 juin 2014, au CNRS.



Lancé récemment, le **projet Midas** aborde cette thématique au niveau européen, avec comme

objectifs d'identifier l'échelle, la nature et la durée des impacts potentiels liés à l'exploitation des ressources sur les écosystèmes profonds, de proposer des solutions pratiques et des codes de bonne conduite pour une exploitation raisonnée d'un point de vue environnemental et sociétal et de développer des technologies abordables pour l'évaluation et le suivi de l'impact environnemental ainsi que la restauration des écosystèmes.

Biodiversité des marges

La **campagne Madeep**, effectuée à bord du N/O *Alis*, a exploré la biodiversité benthique profonde en Papouasie Nouvelle-Guinée, en cherchant notamment de nouvelles zones de suintements froids ou de monts sous-marins, pour apporter un autre éclairage aux problématiques sur les patrons de diversité et de connectivité et pour évaluer l'étendue de l'impact des activités minières à terre sur les communautés de sources froides. MaDeep s'insère dans le programme d'exploration Tropical Deep Sea Benthos (TDSB), autour duquel le MNHN et l'IRD animent depuis plus de trente ans un réseau de taxonomistes.

Développements technologiques associés à l'exploration des grands fonds

Pénétrromètre Penfeld 50 mètres et sa tige instrumentée

Le pénétrromètre Penfeld permet actuellement de mesurer *in situ* et en temps quasi réel, les caractéristiques géotechniques, mécaniques et lithologiques des couches sédimentaires superficielles jusqu'à 30 m sous le fond marin. Face à des besoins d'analyses des couches plus profondes, une étude a été menée avec l'objectif de porter la capacité de fonçage du pénétrromètre Penfeld à 50 m. Après les études de faisabilité, de conception et les modifications sur l'engin et sur la tige piézométrique, les premiers essais de validation ont été effectués au bassin de Brest, en septembre et à bord du N/O *Pourquoi pas ?* et en octobre lors de la campagne d'essais à la mer Estime.

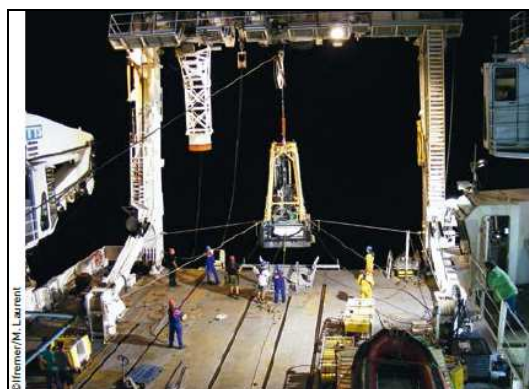


Fig. 2 : Déploiement du pénétrromètre Penfeld 50 mètres lors de la campagne d'essais technologiques Estime

BOB, Bubble Observatory module

BOB est un module d'observation acoustique non câblé conçu autour d'un sondeur halieutique 120 kHz, destiné à collecter des données sur les sorties de fluides et à constituer des séries temporelles représentatives de l'évolution de leurs débits. Pendant la campagne Marsite, BOB a été positionné par le ROV *Victor 6000* à proximité d'une sortie de bulles liées à la dissociation d'hydrates de gaz, afin d'enregistrer les variations de débit en relation avec l'activité sismique de la faille nord-anatolienne en mer de Marmara.



Fig. 3 : Modèle acoustique BOB déployé au bassin d'essais du centre Bretagne pour des tests de fonctionnement sur cible artificielle

Recherches, résultats et partenariats à travers quelques exemples d'articles scientifiques

Les recherches et les résultats de l'Ifremer apparaissent dans toute leur diversité à travers les publications scientifiques dans les journaux à comité de lecture et sont accessibles à toute la communauté scientifique internationale grâce au Web of Science ou la **base de données Archimer en accès libre**.

Une étude originale a été conduite par des chercheurs de plusieurs instituts, en particulier l'Ifremer, le CNRS et l'Ifsttar, pour expliquer **l'existence de précurseurs sismiques** précédant les gros tremblements de terre dans les zones de fracture océaniques. Le modèle proposé permet de prendre en compte les propriétés des fluides circulant le long des failles et de montrer qu'avant la rupture, la compressibilité des fluides hydrothermaux augmente brutalement, de manière significative, ce qui précipite la phase d'instabilité et engendre des signaux précurseurs (Géli et al., 2014).

Géli L., Piau J.M., Dziak R., Maury V., Fitzenz D., Coutellier Q., Henry P. *Seismic precursors linked to super-critical fluids at oceanic transform faults. Nature Geoscience, 7 : 757-761 DOI: 10.1038/NNGEO02244 - IF=11,7*

Des partenariats Européens et internationaux

Les orientations de la politique de recherche européenne

Implication dans les initiatives européennes sur les ressources minérales

La Commission européenne a lancé, fin 2013, un « appel à engagement » pour contribuer à la mise en œuvre du partenariat européen d'innovation (PEI) sur les matières premières. Il s'agit d'un concept nouveau, introduit dans l'initiative phare « Une union de l'innovation » de la stratégie Europe 2020. L'Ifremer a fait le choix d'y participer à travers les propositions pilotées par Technip et Eramet, deux de ses partenaires industriels. Les engagements Seaflores (Breakthrough Solutions for Seafloor Mineral Extraction and Processing in deep water environment) et Albatross (Alternative Blue Advanced Technologies for Research On Seafloor Sulfides : securing long-term raw material supply to Europe by developing and testing deep-sea technologies for exploration and evaluation) ont été sélectionnés par la Commission européenne. Ils confèrent aux partenaires impliqués un label d'excellence qui constituera un atout pour l'évaluation des projets Horizon 2020 qui seront déposés sur cette thématique.

Un partenariat privilégié avec les pays de la rive Sud de la Méditerranée

Turquie, maintien d'une coopération privilégiée en géosciences

Deux accords (MOU) ont été signés en 2014 avec la Turquie, d'une part avec le MTA (Direction générale de la recherche et de l'exploration des ressources minérales de la Turquie) pour une collaboration de formation par la recherche en géosciences et, d'autre part, avec le Koeri (*Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute*) afin de concrétiser les travaux débutés dans le cadre du projet européen Marsite, s'intéressant aux **risques géologiques sismiques en mer de Marmara**.



Fig. 4 : Ville d'Istanbul vue de la mer de Marmara

Quelques collaborations stratégiques menées en 2014

Une collaboration accrue avec le Brésil

Fruit du projet partenarial mené avec Petrobras, la **campagne océanographique Salsa**, qui s'est déroulée d'avril à mai 2014, a été couronnée de succès. Les relations avec la Secirm (Commission interministérielle sur les ressources marines) ont été relancées, avec l'objectif de partager et d'élaborer ensemble des positions stratégiques sur le développement des sciences de la mer dans l'océan Atlantique. La mobilisation des équipes Ifremer dans ce partenariat avec les équipes de recherche brésiliennes s'inscrit également dans une dynamique nationale pilotée par AllEnvi.

Coopération avec de nouveaux partenaires

Avec le soutien de l'ambassade de France au Mozambique, l'Ifremer a signé, le 28 octobre 2014, un accord (MoU) avec l'**université Eduardo Mondlane (UEM) de Maputo**. Les thématiques retenues dans cet accord de coopération sont les géosciences marines et la biodiversité marine dans le canal du Mozambique. La signature s'est déroulée à bord de L'Atalante, de passage à Maputo dans le cadre des campagnes du projet Pamela. Lors de cette escale, le ministre de la recherche et de la Technologie (MCTI) du Mozambique a souhaité mettre en place une coopération institutionnelle entre les deux pays sur le canal du Mozambique.

L'Ifremer et le groupe transversal « outre-mer » d'AllEnvi

L'Ifremer anime les activités du groupe transversal « outre-mer » d'AllEnvi. Ce groupe est constitué de représentants des douze membres fondateurs de l'Alliance. En 2014, le groupe a assuré le recensement des activités outre-mer des membres d'AllEnvi et de la bibliométrie scientifique outre-mer. Le travail a commencé au printemps 2013 et le rapport correspondant a été remis à l'Alliance en juillet 2014. La recherche ultramarine est aujourd'hui relativement isolée et pas suffisamment attractive pour les équipes françaises de métropole et/ou européennes. L'optimisation des coûts de cette recherche ultramarine et l'équilibre entre une recherche outre-mer tournée vers les problématiques locales et une recherche scientifique d'excellence sont des enjeux majeurs pour les prochaines années.

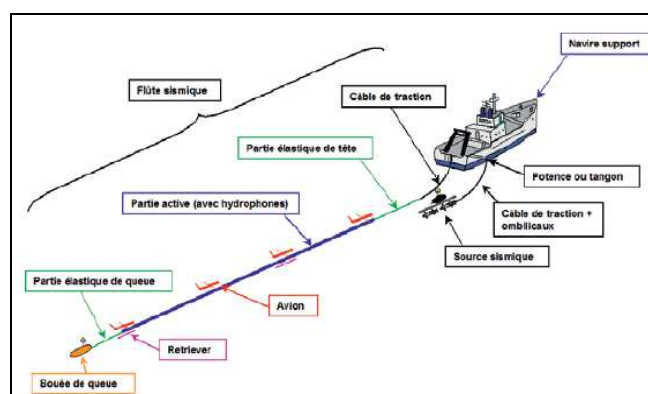
Infrastructures, technologies

Flotte et équipements sous-marins

Équipements de sismique

Pour répondre à la demande scientifique et du fait du caractère non maintenu des équipements actuels, qui datent de 1999, l'Ifremer a décidé de renouveler ses équipements de sismique. L'objectif est de mettre à la disposition des scientifiques deux équipements principaux : un dispositif comprenant une **flûte sismique de 6 000 m de long** et un **dispositif 3D comprenant deux flûtes sismiques de 600 m de long**. L'opération doit s'étaler sur quatre ans, avec une première tranche en 2014 et 2015, qui permettra de remplacer une partie des systèmes actuels sans « interruption de service ».

La première partie de l'année 2014 a été consacrée aux études techniques et à la réalisation des appels d'offres couvrant l'ensemble des équipements. Les premières livraisons sont intervenues en novembre.



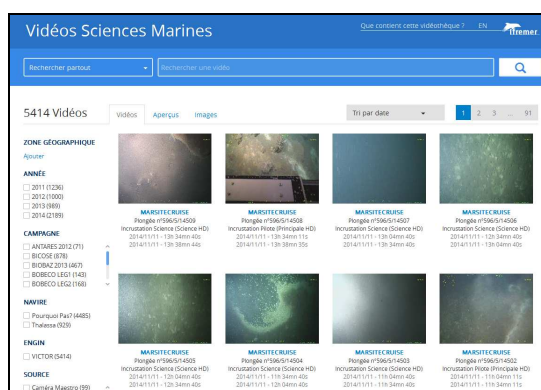
Bases de données marines

Projet de portail des vidéos des engins sous-marins

L'observation vidéo constitue un moyen peu perturbant pour le milieu et fournit désormais des données scientifiques de premier plan pour étudier l'océan benthique : biodiversité, habitats et écosystèmes, géologie et structures à petite échelle, cartographie. Les engins sous-marins produisent des données vidéo et photo depuis près de trente ans, sous divers formats, analogiques et numériques. La généralisation du numérique a permis de rendre systématique l'archivage pérenne de ces données, de mettre au point des algorithmes d'analyse à but scientifique ; mais leur mise à disposition en ligne n'existait pas. Depuis 2010, l'ensemble des vidéos est archivé. Cela a toutefois l'inconvénient d'être très volumineux (4 To en moyenne pour une campagne du ROV *Victor 6000*) et difficilement manipulable sans moyens techniques performants.

Afin de faciliter accès et traitements des vidéos collectées et bancarisées, un prototype de portail en ligne a été développé en 2014. Il permet d'identifier les levés vidéo disponibles, de les pré-

visualiser en ligne et de les télécharger pour traitement. Une étude menée par l'INA (Institut national de l'audiovisuel) a défini les modalités techniques : normes d'encodage et de compression, formats d'archive et de restitution afin de garantir lisibilité à long terme des vidéos et efficacité de visionnage.



L'appui aux politiques publiques

Matières premières et ressources minérales

Granulats marins

L'étude « Granulats marins », commanditée par le MEDDE et qui vise à évaluer les enjeux environnementaux et les usages existants sur les secteurs reconnus comme offrant des ressources en matériaux marins, a été finalisée par la fourniture d'un webSIG, accessible via le serveur de données Sextant (<http://sextant.ifremer.fr/fr/web/granulats-marins>). Il permet ainsi à un large public d'accéder aux résultats de cette étude menée sur près de dix ans (rapports, cartes, visualisation et téléchargement de données).

En 2014 et dans la suite du travail réalisé dans l'étude « Granulats marins », l'Unité Géosciences Marines a coordonné l'intervention de l'Ifremer, en appui du MEDDE, pour la définition de zones de « moindre contrainte » ou de « moindre impact » dans le cadre de la stratégie nationale sur les granulats terrestres et marins. Ce projet devrait aboutir, fin 2015, à la réalisation d'un guide méthodologique pour l'élaboration d'un plan de gestion durable des granulats marins par façade.

The screenshot shows the web application interface for 'Granulats Marins'. The main heading is 'POSSIBILITES D'EXPLOITATION DE MATERIAUX MARINS SUR LES FACADES MER DU NORD, MANCHE ET ATLANTIQUE'. The page contains several sections: a navigation menu at the top, a main text area with introductory paragraphs, a 'Partenaires' section with logos for Ifremer, BRGM, and UNPG, a 'Télécharger les données' section, and a map of the 'Façade Manche-Est' region. The map shows the coastline of the English Channel and Atlantic coast of France, with various regions highlighted in different colors.

Interview : Elda Miramontes Garcia, Doctorante



Le sujet de thèse d'Elda porte sur l'étude des glissements sous-marins en mer tyrrhénienne septentrionale et les relations avec les dépôts contouritiques et turbiditiques. Débutée en octobre 2013, sa thèse s'inscrit dans le programme de recherche Pamela, associant Total, l'Ifremer, le CNRS et plusieurs universités.

Pourquoi et comment avez-vous obtenu une thèse à l'Ifremer ?

J'ai suivi des études en sciences de la mer avec une spécialisation en géologie marine en Espagne, à l'université de Vigo. Lors de mon Master 2, ma co-encadrante du CSIC à Barcelone m'a fait connaître les offres de thèse de l'Ifremer. La renommée de l'institut et l'intérêt du sujet proposé en géologie marine m'ont motivée à postuler, d'autant que j'avais déjà étudié des dépôts contouritiques.

Qu'est-ce qui vous plaît le plus dans votre sujet de thèse ?

Mon sujet de thèse nécessite plusieurs approches, car l'étude porte sur différents domaines de la géologie (géotechnique, sédimentologie et sismique) et inclut aussi de la modélisation. Mon travail est diversifié, ce que j'apprécie beaucoup. Cela me permet aussi d'acquérir de nouvelles connaissances en géotechnique et modélisation. Par ailleurs je trouve intéressant d'être régulièrement en contact avec Total et d'appréhender ainsi le point de vue des industriels.

Vous allez effectuer un séjour d'un mois à l'étranger. Quel en est l'objectif ?

Je bénéficie en effet d'une bourse de l'université européenne de Bretagne pour effectuer un séjour d'un mois à l'Ismar-CNR de Bologne. Je vais récupérer et interpréter des données sismiques complémentaires situées dans la zone de la ride de Pianosa, qui permettront d'améliorer la caractérisation du système contouritique étudié, de faire des analyses granulométriques et de bénéficier de l'expertise de cet institut en paléontologie des mollusques marins. C'est l'occasion de développer la collaboration sur les aspects contouritiques et, pour moi, peut-être, d'envisager un post-doctorat là-bas.

Quels sont vos projets ?

Les années à venir seront consacrées à la finalisation des analyses géotechniques, ainsi qu'à l'écriture de deux articles scientifiques issus de conférences internationales auxquelles j'ai participé (*2nd Deep-Water Circulation Congress*, 10-12 septembre 2014, Gand, Belgique et *7th International Symposium on Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 1^{er}-4 novembre 2015 à Wellington, Nouvelle-Zélande).

Qu'est-ce qui pourrait être amélioré ?

La diffusion des offres de thèse. Si ma co-encadrante de M2 ne m'avait pas parlé de l'appel à candidatures doctorales de l'Ifremer, je n'en aurais pas eu connaissance.